

О ВТОРОМ СПОСОБЕ УСКОРЕНИЯ ПРОЦЕССА В АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЕ С ОБРАТНОЙ МОДЕЛЬЮ

Введение. В настоящее время возникают проблемы при создании адаптивных систем управления. Существует различная терминология в области этих систем. В числе адаптивных называются самонастраивающиеся, самоорганизующиеся, самообучающиеся и обучаемые системы. В качестве обучаемых могут выступать системы программного управления циклически повторяющимися технологическими процессами с адаптивной корректировкой управляющих программ. Важным показателем качества обучаемых систем является скорость сходимости процесса адаптации в условиях случайных возмущающих воздействий. Известно техническое решение по ускорению процесса в адаптивной системе с обратной моделью. В данной работе рассматриваются второй способ ускорения процесса адаптации, более эффективный в сравнении с известным.

Анализ известных источников. Известны автоматизированные технологические объекты (АТО), в которых управление осуществляется по циклически повторяющимся программам. Примерами таких АТО являются металлорежущие станки с программным управлением и станы горячей прокатки.

Корректировка программ в общем случае осуществляется по формуле

$$c_v(n) = c_{v-1}(n) + \Delta c_v(n) = c_{v-1}(n) + \gamma_v f\{\varepsilon_{v-1}(n)\}, \quad n \in [0, N], \quad v=1,2,\dots, \quad (1)$$

где v – номер цикла корректировки, $c_v(n)$ – корректирующий сигнал, γ_v – коэффициент усиления в контуре адаптивной корректировки, $\varepsilon_{v-1}(n)$ – ошибка предшествующего цикла воспроизведения управляющей программы, $f\{\}$ – функция, определяемая этой ошибкой и обеспечивающая сходимость процесса ее минимизации, N – количество кадров в программе.

Ошибки выполнения программы состоят из регулярной и случайной составляющих. Последняя является центрированной аддитивной. Источником ее могут выступать как процесс обработки деталей сложной формы, так и ошибки автоматического измерения размеров последних. Целью адаптации является формирование корректирующего сигнала, обеспечивающего сведение к нулю регулярной составляющей ошибки. Для этого требуется сходимость процесса (1). В опубликованных работах рассматривались задачи обеспечения сходимости процессов как при отсутствии случайной составляющей ошибки, так и при наличии ее.

В решении задачи обеспечения сходимости процесса адаптации в условиях помех оказалось эффективным применение математического аппарата – метода стохастической аппроксимации. Рекомендации по его использованию даны в [1]. Проблемы обеспечения сходимости порождаются тем обстоятельством, что условия сходимости для регулярной и случайной составляющих ошибки различны. Как следует из [1], для обеспечения сходимости процесса (1) в условиях, когда регулярная и случайная составляющие возмущающего воздействия стационарны, коэффициент усиления в контуре адаптации должен удовлетворять требованиям:

$$\sum_{v=1}^{\infty} \gamma_v = \infty, \quad (2) \quad \sum_{v=1}^{\infty} \gamma_v^2 < \infty. \quad (3)$$

Условие (2) относится к регулярной составляющей ошибки, а условие (3) – к случайной составляющей. Выполнение последнего требует бесконечного числа циклов корректировки с уменьшением в каждом цикле коэффициента усиления со стремлением его к нулю.

Основополагающим техническим решением в задачах обеспечения сходимости процесса адаптации, как для регулярной, так и случайной составляющих ошибки, явилось использование в адаптивном контуре системы обратной модели (ОМ) АТО.

В работе [2] показано, что в случае отсутствия помех можно обеспечить полную корректировку программы уже после одного цикла ее воспроизведения. Для этого необходимо осуществить ОМ АТО на средствах дискретной вычислительной техники и обеспечить ввод корректирующего сигнала с упреждением на один такт дискретного времени. Указанная ОМ должна удовлетворять следующему требованию: переходная характеристика комплекса из последовательно соединенных ОМ и АТО в дискретном времени имеет вид:

$$h_k(n) = 1 \text{ при } n \geq 1 \text{ и } h_k(n) = 0 \text{ при } n \leq 0 \quad (4)$$

где n – дискретное время.

Техническое решение дискретной ОМ, удовлетворяющей условию (4), было найдено на базе компьютерных технологий. Оно защищено авторским свидетельством [3].

Классическая структурная схема адаптивной системы с обратной моделью показана на рис.1.

Символами на схеме обозначены: УП – управляющая программа, АТО – автоматизированный технологический объект, ОМ – обратная модель, ДИ – дискретный интегратор, БСА – блок статистического анализа. Знаком умножения обозначено безынерционное звено с изменяемым коэффициентом усиления γ_v .

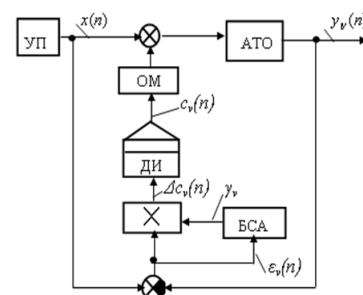


Рисунок 1 Структурная схема адаптивной системы

На основании зарегистрированной ошибки формируется поправка на программу $\Delta c_v(n)$, которая подается на вход ДИ. Далее для общей ошибки v -го цикла воспроизведения программы принимаем выражение

$$\varepsilon_v(n) = \bar{\varepsilon}_v(n) + \tilde{\varepsilon}_v(n), n \in [0, N], \quad (5)$$

где $\bar{\varepsilon}_v(n)$ и $\tilde{\varepsilon}_v(n)$ – соответственно регулярная и случайная составляющие.

При решении задачи сходимости процесса адаптации в качестве статистических характеристик регулярной и случайной составляющих зарегистрированных ошибок принимаются их среднеквадратичные значения на интервале цикла N . Поскольку случайная составляющая принимается аддитивной, между средним квадратом общей ошибки и средними квадратами ее составляющих справедливо соотношение:

$$M\{\varepsilon_v(n)^2\} = M\{\bar{\varepsilon}_v(n)^2\} + M\{\tilde{\varepsilon}_v(n)^2\}, n \in [0, N]. \quad (6)$$

В работе [4] найдено условие оптимальности коэффициента усиления γ_v в процессе (1) для обеспечения минимума среднего квадрата ошибки управляющей программы после ее корректировки. Это условие определяется следующим соотношением между регулярной и случайной составляющими зарегистрированной ошибки воспроизведения

$$Y_{v+1} = \frac{M\{\bar{\varepsilon}_v(n)^2\}}{M\{\bar{\varepsilon}_v(n)^2\} + M\{\tilde{\varepsilon}_v(n)^2\}}. \quad (7)$$

В этой же работе указывается, что оптимальное значение коэффициента усиления, описываемое выражением (7), может быть определено при отсутствии возможности измерения регулярной и случайной составляющих ошибки. Это достигается за счет двукратного воспроизведения управляющей программы перед ее корректировкой. Важным показателем качества адаптивной системы является высокая скорость сходимости процесса (1). Оптимизация коэффициента усиления по формуле (7) ускоряет процесс сходимости процесса адаптации при работе адаптивной системы в условиях случайных возмущающих воздействий. Но это ускорение является недостаточным. Необходимость двукратного воспроизведения управляющей программы для осуществления одного шага ее корректировки в два раза снижает скорость сходимости.

Требуется поиск технических решений по устранению этого недостатка.

В работе [5] предложен способ повышения скорости сходимости процесса адаптации в системе по рис.1 с двукратным воспроизведением управляющей программы. Структурная схема этой системы аналогична изображенной на рис.1, но для ускорения сходимости при формировании корректирующего сигнала используется усреднитель ошибок двух циклов воспроизведения программы. В этом случае оптимальный коэффициент усиления адаптивного контура определяется выражением:

$$Y_{v+1} = \frac{2M\{\bar{\varepsilon}_v(n)^2\}}{2M\{\bar{\varepsilon}_v(n)^2\} + M\{\tilde{\varepsilon}_v(n)^2\}}. \quad (8)$$

Реализация адаптивной системы, в которой коэффициент усиления адаптивного контура определяется условием (8), дает некоторое ускорение процесса, но оно лишь частично компенсирует потерю скорости из-за двукратного воспроизведения управляющей программы.

Целью данной статьи является устранения указанного недостатка. Предполагается такое осуществление адаптивного контура системы, которое обеспечивает возможность адаптивной корректировки управляющей программы в каждом цикле ее воспроизведения с выполнением условия оптимальности (7). Необходимость введения вспомогательных циклов воспроизведения программы при этом устраняется, что ускоряет процесс адаптации.

Исходные данные и постановка задачи. Рассматривается вопрос ускорения сходимости процесса адаптации в системе, описанной в работе [4]. Структурная схема этой системы изображена на рис. 1.

Входящая в систему ОМ выполнена таким образом, что импульсная переходная функция комплекса «ОМ-АТО» удовлетворяет требованиям (4). ОМ отличается от идеальной временным запаздыванием на один такт дискретного времени. Поэтому зарегистрированный сигнал ошибки подается на вход ДИ с опережающим временным сдвигом на ту же величину, т.е.

$$\Delta c_v(n) = \gamma_v \varepsilon_v(n+1). \quad (9)$$

Будем предполагать, что в системе имеют место случайные возмущающие воздействия, которые приложены к точке измерения ошибки воспроизведения программы. Возмущающие воздействия являются аддитивными. Поэтому составляющие ошибок соседних циклов воспроизведения программы удовлетворяют требованиям:

$$\bar{\varepsilon}_v(n) = \bar{\varepsilon}_{v-1}(n), \quad \tilde{\varepsilon}_v(n) \neq \tilde{\varepsilon}_{v-1}(n), \quad M\{\tilde{\varepsilon}_v(n)^2\} = M\{\tilde{\varepsilon}_{v-1}(n)^2\}. \quad (10)$$

Критерием оптимальности процесса адаптации является стремление к нулю среднего квадрата регулярной составляющей ошибки на всем интервале программы, т.е.

$$\lim_{v \rightarrow \infty} M\{\bar{\varepsilon}_v(n)^2\} = 0, \quad n \in [0, N].$$

Блок статистического анализа БСА предназначен для нахождения оптимального γ_{v+1} , обеспечивающего минимум среднеквадратичной ошибки воспроизведения программы после ее корректировки по результатам анализа ошибок предыдущих воспроизведений в соответствии с условием (7).

Задачей данной работы является ускорение процесса адаптации в адаптивной системе по рис.1 посредством исключения из алгоритма ее работы вспомогательных проигрываний управляющей программы в промежутках между рабочими циклами воспроизведения. Эта задача решается разработкой такого БСА, входящего в адаптивную систему, для функционирования которого достаточна информация об ошибках воспроизведения управляющей программы в предшествующих рабочих циклах. БСА должен обеспечить условие оптимальности (7). Требуется найти математическое описание вновь созданного БСА и предложить его структурную схему.

Решение задачи. Для упрощения задачи создания БСА с указанными требованиями преобразуем запись условия оптимальности (7). Из соотношения (6) следует, что для регулярной составляющей ошибки справедливо выражение:

$$M\{\bar{\varepsilon}_v(n)^2\} = M\{\varepsilon_v(n)^2\} - M\{\tilde{\varepsilon}_v(n)^2\}.$$

Подставляя полученное выражение в соотношение (7), после преобразований получим формулу для оптимального коэффициента усиления в адаптивном контуре:

$$\gamma_{v+1} = 1 - \frac{M\{\tilde{\varepsilon}_v(n)^2\}}{M\{\varepsilon_v(n)^2\}}. \quad (11)$$

Сначала рассмотрим задачу определения численных значений входящих в выражение (11) средних квадратов при работе адаптивной системы по рис. 1. Эта задача выполняется с помощью БСА, структурная схема которого изображена на рис. 2. В состав БСА входят буферная память, элемент задержки, сумматор, блок умножения и вычислитель. БСА функционирует следующим образом.

Регистрируются ошибки двух предшествующих циклов воспроизведения программы. В промежутках между циклами в ДИ вносится поправка в соответствии с выражением (9). Ошибка до корректировки имеет вид

$$\varepsilon_{v-1}(n) = \bar{\varepsilon}_{v-1}(n) + \tilde{\varepsilon}_{v-1}(n), \quad (12)$$

а после корректировки преобразуется к виду

$$\varepsilon_v(n) = (1 - \gamma_v)\varepsilon_{v-1}(n) + \tilde{\varepsilon}_v(n), \quad (13)$$

где γ_v – коэффициент усиления в адаптивном контуре при v -м цикле воспроизведения программы.

В БСА формируется следующая разность между зарегистрированными ошибками: $\Delta\varepsilon = \varepsilon_v(n) - (1 - \gamma_v)\varepsilon_{v-1}(n)$, которая после преобразований с учетом соотношений (10,12,13) получает вид: $\Delta\varepsilon = \tilde{\varepsilon}_v(n) - \tilde{\varepsilon}_{v-1}(n)$.

Находим средний квадрат полученной разности с учетом аддитивности помехи:

$$M\{[\Delta\varepsilon]^2\} = M\{[\varepsilon_v(n) - (1 - \gamma_v)\varepsilon_{v-1}(n)]^2\} = M\{[\tilde{\varepsilon}_v(n)]^2\} + M\{[\tilde{\varepsilon}_{v-1}(n)]^2\} = 2M\{[\tilde{\varepsilon}_v(n)]^2\}$$

Из полученной зависимости находим выражение для среднего квадрата случайной составляющей ошибки при v -м воспроизведении программы:

$$M\{[\tilde{\varepsilon}_v(n)]^2\} = \frac{M\{[\varepsilon_v(n) - (1 - \gamma_v)\varepsilon_{v-1}(n)]^2\}}{2}.$$

Подставив полученное значение среднего квадрата случайной составляющей ошибки в формулу (11), находим математическое описание для искомого БСА, структурная схема которого изображена на рис.2:

$$\gamma_{v+1} = 1 - \frac{M\{[\varepsilon_v(n) - (1 - \gamma_v)\varepsilon_{v-1}(n)]^2\}}{2M\{[\varepsilon_v(n)]^2\}}. \quad (14)$$

Реализация БСА с использованием в его вычислителе формулы (14) дает возможность находить оптимальный коэффициент усиления без промежуточных вспомогательных воспроизведений программы. При этом необходимо иметь информацию о зарегистрированных ошибках двух предшествующих циклов воспроизведения программы, а также информацию о коэффициенте усиления γ_v , использованном при корректировке программы в v -м цикле. Если же указанная корректировка не производилась, то в формуле (14) необходимо принять коэффициент усиления предыдущего цикла воспроизведения программы равным нулю ($\gamma_v = 0$).

Выводы. Использование в адаптивной системе ОМ АТО совместно с предлагаемым способом подстройки коэффициента усиления обеспечивает оптимальную корректировку программы в любых циклах ее воспроизведения. Возмущающие воздействия при этом могут быть как стационарными, так и медленно изменяющимися во времени. Для получения статистических данных об ошибках не требуется проведения экспериментальных проигрываний программы, что вдвое ускоряет процесс адаптации.

Литература

1. Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах / Я.З. Цыпкин. – М.: Наука, 1968. 400 с.
2. Клименко А.К. О сходимости процессов адаптации в цифровых системах программного управления станками // В сб. «Адаптивные системы управления металлорежущими станками» под ред. А.Е. Кобринского, Сер. С-1.

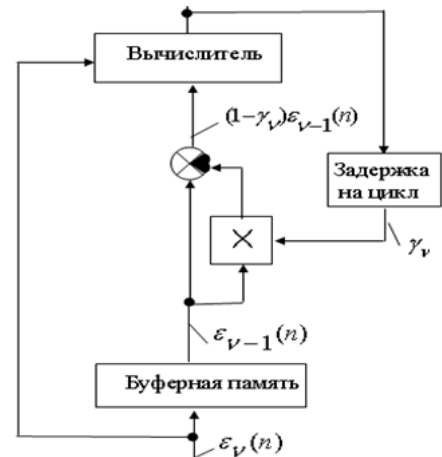


Рис. 2 Структурная схема блока статистического анализа